

基于 SIRP 的时空相关 K- 分布海杂波仿真研究

周万幸

(南京电子技术研究所, 江苏南京 210013)

摘要: 时空相关 K- 分布海杂波的仿真对杂波环境下舰载雷达检测性能的研究具有重要意义. 本文在分析海杂波时空相关特性的基础上, 提出了一种基于球不变随机过程法(SIRP)的时空二维相关 K 分布海杂波仿真方法, 并对其时间相关特性、空间相关特性、幅度分布特性进行了理论分析和仿真, 结果表明, 该方法产生的杂波序列符合 K- 分布, 而且时间和空间相关特性可以根据需要进行设置.

关键词: K- 分布; 球不变随机过程法; 时间相关; 空间相关

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)12-2672-05

Study of Spatial-Temporal Correlated K-Distribution Sea Clutter Simulation Based on SIRP

ZHOU Wanxing

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210039, China)

Abstract: The simulation of spatial-temporal correlated K-distribution sea clutter will benefit the research on detection performance of ship boarded radar in the clutter environment. The features of temporal and spatial correlation are analyzed first in this paper. A simulation method based on SIRP for spatial-temporal correlated K-distribution sea clutter was then proposed. Theoretic analysis and simulation are proceeded for the feature of temporal correlation and spatial correlation and amplitude distribution. Results demonstrate that the clutter generated by this method is K-distribution and its spatial-temporal correlation can be set on demand.

Key words: K-distribution, SIRP, temporal correlated, spatial correlated

1 引言

低空突防已成为现代海战常用的作战方式, 反舰导弹可在离海面几米的高度掠海飞行, 对舰艇构成了严重威胁, 提高复杂电磁环境下低空探测性能是舰载雷达需要迫切解决的问题. 海杂波是影响舰载雷达低空探测性能的重要因素, 海杂波的幅度分布特性是恒虚警设计的重要依据, 海杂波的时间和空间相关特性, 直接决定各种海杂波抑制算法的性能, 因此, 加强对海杂波特性的研究对提高舰载雷达性能非常关键.

海杂波由雷达分辨单元内众多散射体回波矢量叠加而成, 受海浪、涌流等因素影响, 海杂波的特性复杂多变, 与雷达工作频率、分辨率、擦地角、海情等多种参数有关. 几十年来, 国内外很多学者对海杂波进行了深入研究, 通过对大量录取数据的分析, 得出了瑞利分布、对数正态分布、韦布尔分布、K- 分布等各种描述海杂波的模型^[1], 其中 K- 分布模型不仅能很好地满足观测海杂波的幅度分布特性, 而且包含了脉间相关性能, 是目

前公认能比较精确反映雷达海杂波的模型. K- 分布在海杂波模型中的应用, 为相关特性的定量处理提供了依据, 对雷达性能的系统优化起重要作用.

海杂波的仿真是研究雷达在杂波环境下检测性能的基础, 也是各类杂波模拟器研制的关键. 零记忆非线性变换法^[2](ZMNL)和球不变随机过程法^[3](SIRP)是两种常用的 K- 分布海杂波仿真方法, 以这两种算法为基础, 很多文献对 K- 分布海杂波的实现方法进行了研究^[4], 但目前大多数研究都集中在时间相关海杂波的仿真上, 对时间和空间都相关的海杂波仿真研究较少. 本文提出了一种时空相关 K- 分布杂波的仿真方法, 并对该方法的时间相关特性、空间相关特性、幅度分布特性进行了理论分析, 仿真结果验证了分析的正确性.

2 K- 分布杂波模型

在高分辨和低擦地角情况下, 雷达海杂波幅度不再服从瑞利分布, 虽然对数正态分布和韦布尔分布能反映部分高分辨雷达海杂波的幅度分布情况, 但这两个模型

都是基于单点统计特性的, 没有考虑到脉间的相关性, 而海杂波通常具有时间和空间相关性. 为了描述海杂波的脉间相关特性, Jakeman 于 1976 年首次提出了以 K - 分布作为海面电磁散射现象的模型^[5].

在复合 K - 分布模型中, 海杂波的回波幅度被描述为两个因子的乘积, 第一部分是散斑分量 (speckle), 变化较快, 相关时间大约 10ms, 并且可以通过频率捷变实现脉间去相关, 散斑分量是由大量散射体反射量相叠加而成, 符合瑞利分布. 第二部分是基本幅度调制分量, 变化较慢, 相关时间达 1~2s, 且不受频率捷变的影响, 符合 χ (Chi) 分布. K - 分布的概率密度函数为:

$$p(x) = \frac{2}{a\Gamma(v)} \left(\frac{x}{2a}\right)^v K_{v-1}\left(\frac{x}{a}\right), v > 0; a > 0 \quad (1)$$

式中 $K_{v-1}(\cdot)$ 为修正的 $v-1$ 阶贝塞尔函数, a 为尺度因子, 由杂波的平均功率决定, a 越大, 杂波平均功率越大. v 为形状因子, 对于大多数杂波, 形状因子 v 的取值范围是 $0.1 < v < \infty$. v 越小, 表示杂波尖峰越大, 拖尾越长. 对于高分辨率低擦地角的海杂波, v 的值在 0.1~3 之间.

3 海杂波的时间和空间相关特性

海杂波的时间相关性在时域可以用相关函数来描述, 在频域可以用功率谱来描述, 相关函数与功率谱呈傅立叶变换对的关系. 海杂波的功率谱一般可用高斯函数来描述:

$$S(f) = S_0 \exp\left[-\frac{(f-f_d)^2}{2\sigma_c^2}\right] = S_0 \exp\left[-\frac{(f-f_d)^2 \lambda^2}{8\sigma_v^2}\right] \quad (2)$$

式中: σ_c^2 是杂波功率谱方差, $\sigma_c = 2\sigma_v/\lambda$, σ_v 是速度散布的均方根值, 与杂波内部起伏运动的程度有关, f_d 为杂波谱的中心频移.

海杂波的空间相关特性与海浪或海面波的状态密切相关, 海杂波在距离方向的相关长度 ρ 与风速、引力等有关, 根据文献^[6]

$$\rho = \frac{\pi W^2}{2g} \left(3\cos^2\theta + 1\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 θ 为观测方向与风向的夹角, W 为风速, g 为重力加速度. 表 1 给出了不同海态和风速情况下的杂波相关距离, 对于带宽 10MHz 左右的雷达, 相隔 4 个距离波门以上, 杂波就基本不相关了.

海杂波沿方位向的相关性与沿距离向的相关性类似, 与海浪或海面波的状态密切相关, 不同海态下相关距离约几米到几十米. 除了 SAR 和 ISAR 等成像雷达外, 一般雷达方位向分辨率较差, 方位向波束宽度 ρ 的雷达, 在 10km 处的方位向分辨力已超过 100m, 大于相关距离, 不同波位之间海杂波幅度基本不相关.

表 1 不同海态下的杂波相关距离

海态	风速 (m/s)	相关距离/m	
		顺风/逆风	侧风
1	2.5	2	1
2	4.5	6.5	3.2
3	6	11.5	5.8
4	8.5	23.1	11.6
5	11	38.7	19
6	14	62.8	31

4 时空相关 K 分布杂波的仿真

4.1 K - 分布海杂波仿真的基本方法

基本的 K - 分布雷达海杂波仿真算法主要有以下两种:

4.1.1 零记忆非线性变换法 (ZMNL)^[2]

ZMNL 方法产生 K - 分布杂波的原理见图 1. 白高斯随机序列 $w(k)$ 经过滤波器 $H(f)$ 后, 得到相关高斯随机序列 $z(k)$, ZMNL 将 $z(k)$ 的概率密度函数变成所需信号 $x(k)$ 的概率密度函数. ZMNL 产生相关 K - 分布模拟海杂波数据

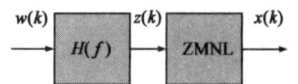


图 1 零记忆非线性变换法原理框图

的优点是运算效率高、性能较稳定, 但是经过 ZMNL 变换后, $x(k)$ 的自相关函数 $R_{xx}(m)$ 与 $z(k)$ 的自相关函数 $R_{zz}(m)$ 之间存在一定的非线性关系, 而且非线性输入端与非线性输出端相关系数之间的关系只能在一定的假设条件下才有确定的解. ZMNL 方法通常只模拟海杂波的幅度, 应用受到一定限制.

4.1.2 球不变随机过程法 (SIRP)^[3]

现代雷达通常都采用相参处理, 接收端产生 I 、 Q 路正交信号, 因此杂波的仿真也应产生 I 、 Q 路杂波. 相参 K - 分布海杂波的仿真可以用球不变随机过程来进行, 根据球不变随机过程理论, 分别产生一个相关高斯过程和一个具有 χ (Chi) 分布的随机变量, 用随机变量调制高斯过程即得到相应的相参 K - 分布海杂波模拟数据, 用 SIRP 方法进行仿真与海杂波复合散射机理更贴合, 海杂波的相关性与分布可在一定程度上控制.

基本的 ZMNL 和 SIRP 仿真方法只考虑了 K - 分布杂波的时间相关性, 但海杂波还具有一定的空间相关性, 下面给出一种时间空间同时相关的 K - 分布海杂波仿真方法.

4.2 基于 SIRP 的时空相关海杂波仿真方法

国内外对时间相关 K - 分布杂波的仿真研究较多, 但对时间空间同时相关的 K - 分布杂波仿真研究很少, 主要原因是构造 K - 分布的变换会改变随机过程的相关函数, 特别是要同时维持时间和空间相关函数的不

变比较困难. 我们采用常规的 SIRP 法产生第 m 个距离点的 K - 分布杂波 $z_m(k)$, 通过递推公式 $z_{m+1}(k) = \gamma z_m(k) + \sqrt{1-\gamma^2} g_m(k)$ 产生第 $m+1$ 个距离点的杂波, 从而引入指数衰减的空间相关性 ($0 < \gamma < 1$), 为了保证每个距离点杂波的幅度分布特性以及时间相关性不变, $g_m(k)$ 的选取需要符合一定的规则. 基于 SIRP 的时空相关海杂波仿真方法如图 2 所示.

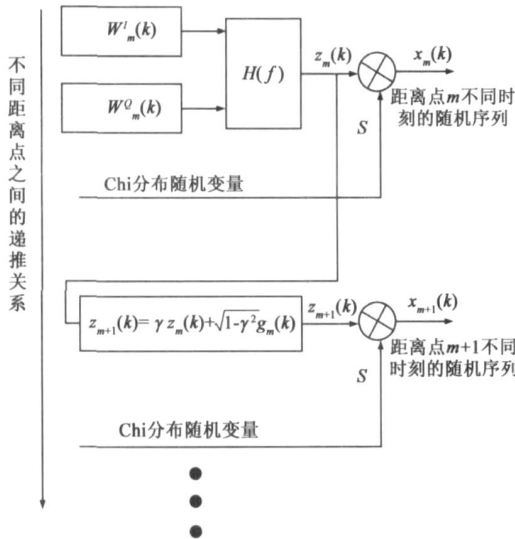


图2 基于SIRP的时空相关海杂波仿真方法

图 2 中, $W_m^l(k)$ 和 $W_m^o(k)$ 为复高斯随机过程的同相分量和正交分量, 滤波器 $H(f)$ 引入杂波的时间相关性. Chi 分布随机变量的仿真方法可参见文献[4], 由 $2v$ 个独立的高斯随机变量合成, 其中 v 为 K - 分布杂波的形状因子.

g_m 的选取规则如下:

(1) g_m 为高斯序列

$$E[g_m(k)] = 0 \tag{4}$$

$$E[g_m^2(k)] = E[z_m^2(k)] \tag{5}$$

(2) g_m 序列与 z_m 序列不相关, 即 z_m 与 g_m 的互相关函数等于 0

$$E[z_m(k)g_{m+n}(k+l)] = 0 \quad (n, l \text{ 为任意值}) \tag{6}$$

(3) g_m 序列与 z_m 序列的自相关函数相同;

$$\begin{aligned} R_{zz}(l) &= E[z_m(k)z_m(k+l)] \\ &= R_{gg}(l) = E[g_m(k)g_m(k+l)] \end{aligned} \tag{7}$$

(4) g_m 序列在空间不相关

$$E[g_m(k)g_{m+l}(k)] = 0, \quad l \neq 0 \tag{8}$$

4.3 性能分析

4.3.1 时间相关性分析

根据 SIRP 算法原理, 通过调整滤波器 $H(f)$, 可以保证 $z_m(k)$ 序列按照所需时间相关性生成. 下面分析 $m+1$ 个距离点的杂波序列 $z_{m+1}(k)$ 的时间相关性.

$$\begin{aligned} R(l) &= E[z_{m+1}(k)z_{m+1}(k+l)] \\ &= E\left[\left(rz_m(k) + \sqrt{1-r^2}g_m(k) \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot \left(rz_m(k+l) + \sqrt{1-r^2}g_m(k+l) \right) \right] \\ &= E[r^2z_m(k)z_m(k+l)] \\ &\quad + E[(1-r^2)g_m(k)g_m(k+l)] \\ &\quad + E[r\sqrt{1-r^2}z_m(k)g_m(k+l)] \\ &\quad + E[r\sqrt{1-r^2}g_m(k)z_m(k+l)] \\ &= r^2R_{zz}(l) + (1-r^2)R_{gg}(l) \\ &= R_{zz}(l) \end{aligned} \tag{9}$$

从公式(9)可以看出: $z_{m+1}(k)$ 的时间相关函数与 $z_m(k)$ 的时间相关函数相同, 依次类推, 可以保证其他距离点也具有相同的时间相关函数, 这表明图 2 所示方法产生的杂波序列满足时间相关性要求.

4.3.2 空间相关性分析

由于图 2 中 S 为 Chi 分布随机变量, 随机过程 $x_m(k)$ 的空间相关系数与 $z_m(k)$ 空间相关系数之间只差一个常量, 下面分析 $z_m(k)$ 的空间相关性.

$$\begin{aligned} &E[z_m(k)z_{m+l}(k)] \\ &= E\left[z_m(k) \left(rz_{m+l-1}(k) + \sqrt{1-r^2}g_{m+l-1}(k) \right) \right] \\ &= E[rz_m(k)z_{m+l-1}(k)] \\ &= r^l R_{zz}(0) \end{aligned} \tag{10}$$

式中: $z_{m+l}(k)$ 为第 $m+l$ 个距离点的杂波序列, 从公式(10)可以看出, $z_m(k)$ 的空间相关系数呈指数衰减, 通过调整衰减系数 γ , 可以保证所产生序列满足表 1 所分析的相关距离要求.

4.3.3 幅度分布特性分析

由于 S 为 Chi 分布随机变量, 根据 SIRP 算法的原理, 只要 $z_{m+l}(k)$ 服从高斯分布, $x_{m+l}(k)$ 的幅度即服从 K - 分布, 下面先分析 $z_{m+1}(k)$ 的分布特性. 根据图 2

$$z_{m+1}(k) = rz_m(k) + \sqrt{1-r^2}g_m(k) \tag{11}$$

式中, $z_m(k)$ 为高斯随机过程, 其均值为 0, 方差可根据所需 K - 分布的尺度因子而调整. $g_m(k)$ 为高斯随机过程, 根据高斯随机过程线性变换仍是高斯随机过程的性质, 可以确定 $z_{m+1}(k)$ 为高斯随机过程. 其均值和方差分别如下:

$$\begin{aligned} E[z_{m+1}(k)] &= E[rz_m(k) + \sqrt{1-r^2}g_m(k)] = 0 \tag{12} \\ E[z_{m+1}^2(k)] &= E\left[\left(rz_m(k) + \sqrt{1-r^2}g_m(k) \right)^2 \right] \\ &= r^2E[z_m^2(k)] + (1-r^2)E[g_m^2(k)] = E[z_m^2(k)] \end{aligned} \tag{13}$$

从式(12)和式(13)可以看出: $z_{m+1}(k)$ 是与 $z_m(k)$ 具有相同统计特性的高斯随机过程. 通过递推, 容易发现 $z_{m+l}(k)$ 也是与 $z_m(k)$ 具有相同统计特性的高斯随机

过程, 因此 $x_{m+1}(k)$ 服从 K- 分布. 综上所述, 图 2 所示仿真方法可产生符合要求的时空相关 K- 分布海杂波.

5 仿真结果

仿真参数如下: 工作频率为 10GHz, 脉冲重复周期 1ms, 杂波谱的标准差 σ_v 为 1.5m/s, 杂波功率谱服从高斯分布, 空间相关服从指数衰减, K- 分布杂波的形状因子 $\nu=1$, 尺度因子 $a=1$.

图 3 给出了时间长度为 5s 的海杂波随机序列, 幅度对最大值进行归一. 图 4 给出了海杂波幅度统计的直方图, 仿真样本数为 500000, 统计间隔为 0.01.

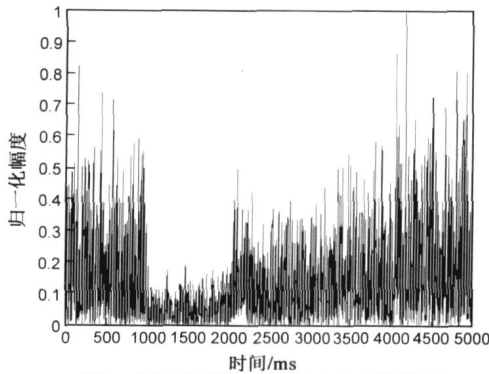


图3 时间长度为5s的海杂波幅度数据

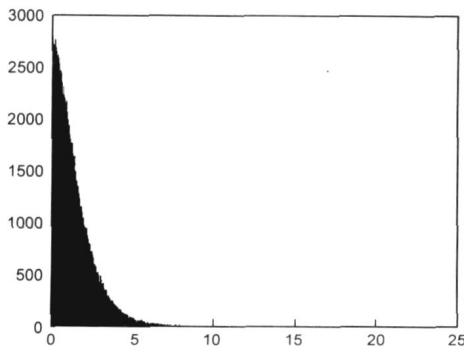


图4 海杂波幅度统计直方图

图 5 为仿真产生的海杂波序列幅度分布统计曲线与 K- 分布理论曲线的对比图, 图中实线为仿真序列的统计结果, 仿真样本数为 500000, 统计间隔为 0.01; 虚线为 K- 分布杂波的概率密度函数, 形状因子 $\nu=1$, 尺度因子 $a=1$. 从图中可以看出, 本文所提仿真方法产生的数据与 K- 分布非常吻合.

图 6 描述了海杂波仿真序列的时间相关特性, 仿真中杂波谱的标准差 σ_v 为 1.5m/s, 杂波谱的功率谱方差为 100Hz, 理论上海杂波的相关时间约 10ms, 仿真结果与理论分析基本一致.

图 7 分别仿真了衰减系数 $\gamma=0.9$, $\gamma=0.8$ 下的海杂波空间相关特性, 从图中可以看出: 在相关距离内, 不同 γ 值的仿真结果与理论结果比较接近, $\gamma=0.9$ 时的相关距离比 $\gamma=0.8$ 时的相关距离长, 通过调整衰减

系数 γ , 可以仿真不同相关距离的海杂波.

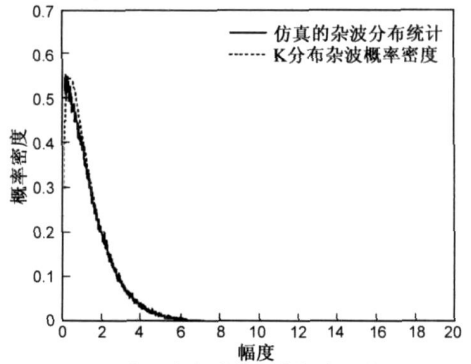


图5 海杂波的幅度概率分布

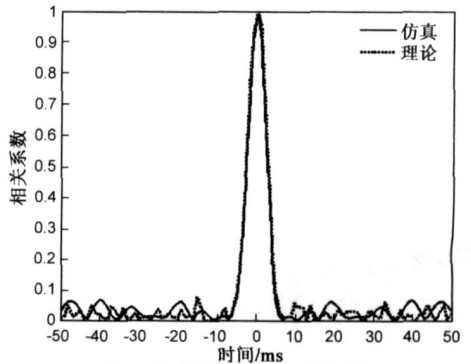


图6 海杂波的时间相关特性

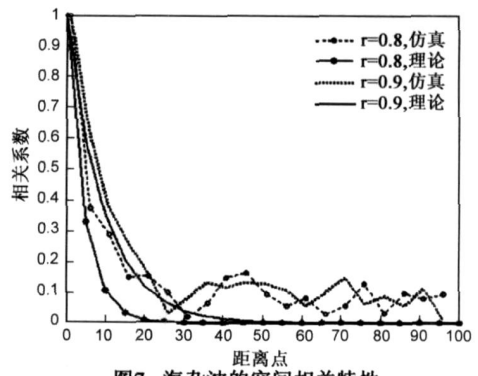


图7 海杂波的空间相关特性

6 结束语

本文提出了一种时空相关 K- 分布海杂波仿真方法, 该方法基于 SIRP 算法, 可以仿真相参雷达接收端的 I、Q 路杂波数据, 文中对杂波的分布特性、时间相关特性和空间相关特性进行了分析, 并通过仿真产生了杂波数据, 对杂波的分布特性和相关特性进行了统计, 结果表明, 该方法产生的杂波幅度符合 K- 分布, 而且可以根据需要设置杂波的时间和空间相关性.

参考文献:

[1] H C Chan. Radar sea clutter at low grazing angles[J]. IEE Proceedings F, 1990, 137(2): 102- 112.

- [2] L J Marier. Correlated K-distributed clutter generation for radar detection and track[J]. IEEE Trans on AES, 1995, 31(22) : 568 - 580.
- [3] E Conte, M Longo. Characterization of radar clutter as a spherically invariant random process[J]. Communications, Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F, 1987, 134(2): 191 - 197.
- [4] 吕雁, 史林, 杨万海. SIRP 法相干相关 K 分布雷达杂波的建模与仿真[J]. 现代雷达, 2002, 24(2) : 13- 16.
Lu Yan, Shi Lin, Yang Wan hai. Modeling and simulation of coherent correlation K-distributed radar clutter using SIRP[J]. Modern Radar, 2002, 24(2) : 13- 16. (in Chinese)
- [5] E Jakeman, P N Pusey. A model of non-rayleigh sea echo[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1976, 24(6): 806- 814.
- [6] S Watt. Cell averaging CFAR gain in spatially correlated K-distributed clutter[J]. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, 1996, 143(5): 321- 327.

作者简介:

周万幸 男, 1961 年 8 月出生于浙江北仑, 现为南京电子技术研究所研究员级高工, 研究方向为雷达系统设计.

E-mail: zwj@niet.com